

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：55502

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24810029

研究課題名(和文)超小型ECRイオン源の設計指針構築に向けた多価イオンの計測・制御に関する研究

研究課題名(英文) Measurement and control of multi-charged ions for the miniaturization of ECR ion sources

研究代表者

浅地 豊久 (Asaji, Toyohisa)

大島商船高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：70574565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：電子サイクロトロン共鳴イオン源の小型化に関する設計指針構築に向けて、次の実験および設計を行った。最初に、プラズマ中のイオンの計測を行った。その実験において、He添加によるイオンのクーリング効果を確認した。また、プラズマチャンバーの中心軸上の磁場分布や半径方向の磁場分布に関するシミュレーションを行い、小型イオン源で使用する磁場を設計した。さらには、イオンビームのナノ材料プロセス応用として、フラーレン薄膜への鉄イオン照射を行い、鉄内包フラーレンの合成を確認した。

研究成果の概要(英文)：We have developed electron cyclotron resonance ion sources (ECRIS) for industrial use. In this project, we set a goal to provide guidelines for miniaturization technology of ECRISs. We have reported some experiments and design of a new ECRIS. (1) We have adopted gas-mixing techniques to cool the plasma and then reduce fullerene dissociation. Mass spectra of ion beams extracted from fullerene-He, Ar or Xe mixed plasmas were observed with a Faraday cup. The He gas mixing technique is effective against fullerene destruction. (2) We have designed a new ion source for improvement of production efficiency of multi-charged ions. A minimum-B magnetic field was designed using mainly permanent magnets. (3) A low energy Fe<sup>+</sup> ion beam was irradiated to C60 thin film. Fe<sup>+</sup>-irradiated C60 thin film was analyzed by high performance liquid chromatography and laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. As a result, we could synthesize the Fe + C60 complex as a new material.

研究分野：総合理工

科研費の分科・細目：量子ビーム科学・量子ビーム科学

キーワード：プラズマ イオンビーム 電子サイクロトロン共鳴

## 1. 研究開始当初の背景

多価イオンは、電子が2個以上剥ぎ取られたプラスイオンで、1価のイオンに比べて加速が容易なため、これまでに放射線ガン治療や新元素合成研究に利用されてきた。その生成方法や装置、高価数化および高収量化について長年研究されてきたが、産業応用はほとんど進んでいないのが現状である。その原因として、これまで開発されてきた電子ビームイオン源 (EBIS) や電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源などの多価イオン源は大型で高価であり、さらに取り扱いが難しく材料研究者らにとって簡単に扱えるものではないことが挙げられる。

このような状況ではあるが、その中でも ECR イオン源は原理的には小型化も可能と考えられ、中程度までの価数の多価イオンを大電流ビームとして生成できることが特長であるため、多価イオン源の中では産業応用に向いていると言われている。例えば、半導体のイオン注入装置業界が、装置の大型化を避けるためイオンの加速電圧を下げるべく、多価イオンの利用に着目し始めており、ECR イオン源の採用を検討している。しかしながら、装置開発エンジニアにとっては多価イオン源のキーポイントを熟知することは困難であるため、多くの課題が出ており、実用化はほど遠いのが現状である。

代表者らは、東洋大学向けに ECR イオン源を設計・製作し、その後も装置および材料プロセスの研究開発を行ってきた。特に、ECR イオン源を用いた金属内包フラレン生成研究の一環として、イオン源内のプラズマ計測・制御およびフラレンイオンの生成プロセス開発などに携わっている。

本研究ではイオン源の構造などが多価イオン生成にどう影響するかを明らかにするために、イオン源内のプラズマおよび多価イオンの計測・制御およびイオン挙動の解析研究に取り組み、小型化に向けた設計指針を示すことを目標とする。

## 2. 研究の目的

中長期の目的は、これまで理学研究などの科学者が主として開発してきた ECR イオン源を工学的に再検討し、産業応用に活かして、日本の技術力の優位性の一端を担うことである。それに向けて、本研究では工学的な見地から、ECR イオン源の機械的および電気的な構造の最適化やイオン源の制御性の研究を行い、小型化に向けた構造設計の指針を明らかにする。また、ECR イオン源で生成したイオンビームの応用例として金属内包フラレンの生成を試みる。

## 3. 研究の方法

### (1) ECR イオン源内でのイオン運動の基礎評価

一般的な ECR イオン源のプラズマチャンバ

ーは内径が 10cm 以下と小さく、さらにチャンパーまわりにはミラー電磁石やマルチポール永久磁石が設置されているため、チャンパー内に計測プローブなどを導入することが困難である。そのため、イオンの挙動解析などはシミュレーションが主であり、チャンパー内で直接計測したデータは不十分であると言える。

本研究では、プラズマ中にプローブを設置し、マイクロ波のパルスに対するイオン拡散挙動の観測やプラズマパラメータの測定などを行う。これを Ar、Xe など質量が違う数種類のガス種によって行い、イオンの基本的な運動を明らかにする。

### (2) フラレンプラズマにおけるイオン挙動の解析

代表者らは、ECR イオン源に導入するマイクロ波をパルス変調した場合について、マイナス電圧を印加したプローブを用いてプラズマ中のイオン電流の変化を測定し、フラレンイオンの電流がパルス OFF 時に上昇する奇妙な振る舞いを発見した。

フラレンはプラズマ中で容易に壊れ、しかもその解離パターンは多岐にわたり、さらには多価イオンも簡単にできるため、調査対象としては非常に複雑であるものの、質量が大きいため動作が遅く、解析しやすい。本研究において、フラレンイオンの挙動の計測・解析を行う。

### (3) 多価イオン生成に関する磁場形状依存性の検討

代表者らは、ECR イオン源で高密度プラズマを生成するために永久磁石を用いた独自の磁場形状「円筒型磁場」を考案し、プラズマ密度  $10^{18} \text{m}^{-3}$  台のプラズマ生成に成功した。この磁場形状を超小型イオン源に適用する設計指針を得るため、東洋大学の装置を用いてミラー電磁石の磁場強度およびそれら2個のバランスを変化させ、イオンの挙動および多価イオン生成のメカニズムを明らかにする。

### (4) プラズマチャンパー構造・材料最適化の検討

ECR プラズマでは、マイクロ波の電磁界モードとの関係からプラズマチャンパー直径は重要なパラメータとなっている。代表者らは、マイクロ波モードを制御することによって、イオンビームが周期的に変動することを明らかにした。これを踏まえて、チャンパー内のマイクロ波モードを制御する方法を検討する。

### (5) 多価イオンナノ材料プロセスの検討

微粒子の中でも取り扱いが比較的容易なフラレン薄膜にイオン注入を行うことによって、金属を内包する実験を行う。特に、磁性金属の内包フラレンは様々な分野で

の応用が期待されているが、成功例の報告はない。本研究では、鉄イオンビームを照射することにより鉄内包フラーレンの合成を試みる。

#### 4. 研究成果

##### (1) ECR イオン源内でのイオン運動の基礎評価

東洋大学の ECR イオン源を用いて、マイクロ波をパルス変調したときのイオン電流値の応答を図 1 に示す。プラズマチャンバー内に設置されているバイアスディスクを流れる電流値を測定した。この結果より、原子番号の大きい希ガスの方が、パルス応答が速いことが分かった。バイアスディスクはプラズマ生成部から離れたミラー磁場の端部に設置されているため、パルス ON/OFF による応答は移動度の高い軽い原子ほど速いと予想していた。しかしながら、Xe の応答が速く、これはプラズマ密度の増減によるものと考えられ、各原子の電離エネルギーの違いで説明できる。これらより、プラズマ密度を上げる場合は、電離しやすい Xe 等を添加することが有効であることが分かった。装置を小型化した際にも本手法の効果は期待できる。

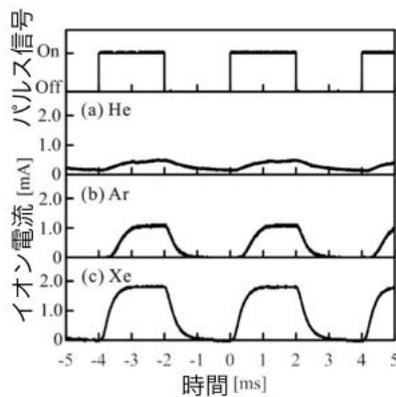


図 1. 希ガスプラズマにおけるイオン電流値のパルス応答

##### (2) フラーレンプラズマにおけるイオン挙動の解析

フラーレンプラズマに希ガスを混合し、引き出したイオンビームの質量分離を行った結果を図 2 に示す。この結果より、He を混合するとフラーレンの解離が抑制され、質量の大きい Ar や Xe を混合するとフラーレンの解離が進むことが明らかになった。軽いガスの混合によってイオンが冷却される等の効果は、多価イオン生成において研究されており、本実験でも効果が明らかになった。(1)の結果とともに、装置を小型化した際にもガス混合によって、多価イオン生成の効率向上が期待できる。

##### (3) 多価イオン生成に関する磁場形状依存性の検討

東洋大学のイオン源において、ミラー磁場

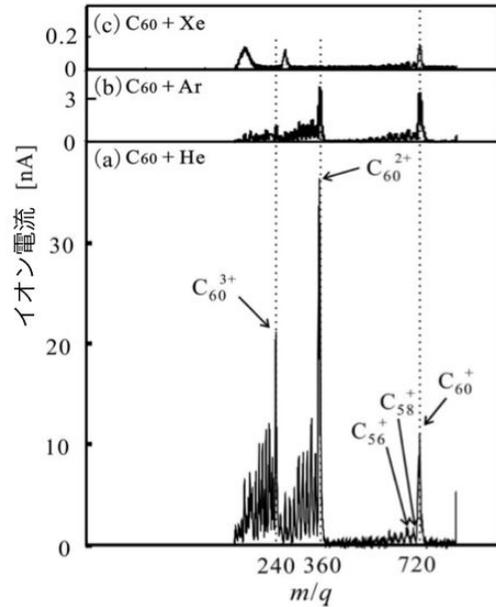


図 2. フラーレンプラズマにおける希ガス混合効果

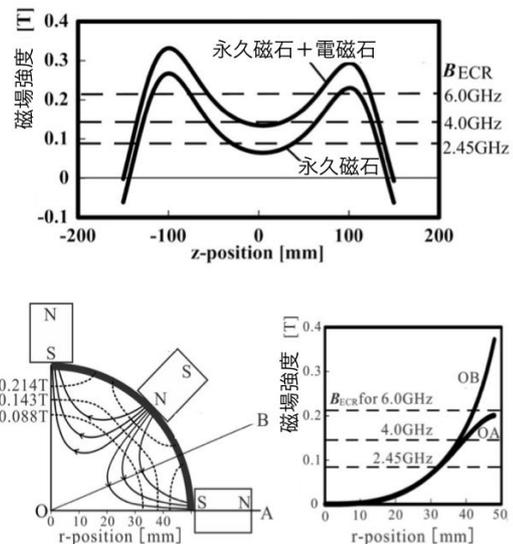


図 3. 永久磁石を主としたミラー磁場 (上) とマルチポール磁場 (下)

のバランスを変化させ、イオン生成の実験を行ったが、それほど大きな変化は見られなかった。

そこで本研究では、将来の小型イオン源の開発に向けて、その設計指針を検討した。小型化のため永久磁石でミラー磁場を組み、補正用に 3 個の電磁石を使用する構成として、有限要素法により磁場の設計を行った (図 3)。永久磁石のみのイオン源は放射線医学総合研究所で開発されたが、ミラー磁石と六極磁石が一体となっており、小型化やプラズマ観測等を行う開発用には適していない。よって、本研究では分割された永久磁石によって、2.45~6 GHz で共鳴条件が得られるように設計した。

#### (4) プラズマチャンバー構造・材料最適化の検討

本研究期間の約1年半の間に材料の検討実験までは進めなかった。そこで、過去の知

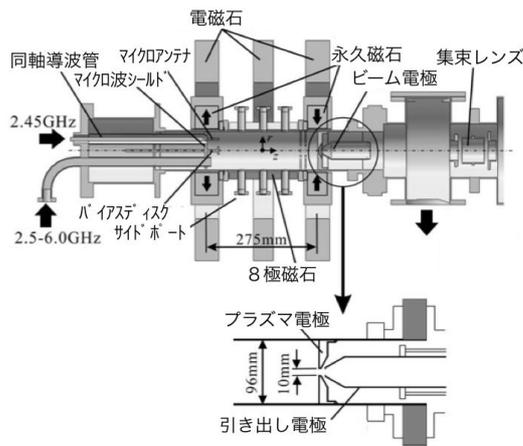


図4. 新 ECR イオン源構想図

見をもとに、チャンバー構造を検討し、マイクロ波モードの制御がしやすいような構想設計を行った。一般的な ECR イオン源では、プラズマチャンバー内の電磁界モードを制御することは困難であるが、この検討ではビーム引き出し電極と対向する位置に設置するマイクロ波シールドを可動式とする構想を考案した。

#### (5) 多価イオンナノ材料プロセスの検討

シリコン基板に  $C_{60}$  を蒸着して薄膜とし、鉄のイオンビームを照射した。その薄膜をレーザーイオン化飛行時間型質量分析装置によって分析したところ、わずかな量ではあるが鉄と  $C_{60}$  の化合物のピークが検出された。また、この合成実験において、ビームエネルギーの最適値は 30~40eV であることが分かった。今後、この知見を生かして、量産化に向けた開発を行っていく。

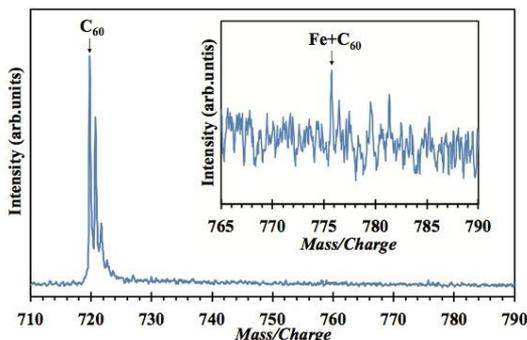


図5. 鉄内包フラレン合成実験の質量分析結果

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

T. Asaji, T. Ohba, T. Uchida, H.

Minezaki, S. Ishihara, M. Muramatsu, R. Racz, S. Biri, A. Kitagawa, Y. Kato, Y. Yoshida, Fullerene-rare gas mixed plasmas in an electron cyclotron resonance ion source, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 85, 2014, pp. 02A936-1-3

DOI: 10.1063/1.4847255

T. Asaji, N. Hirabara, T. Izumihara, T. Hitobo, T. Ohba, T. Nakamizu, T. Nakamura, M. Furuse, Y. Kato, Design of a new electron cyclotron resonance ion source at Oshima National College of Maritime Technology, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 85, 2014, pp. 02A940-1-3

DOI: 10.1063/1.4847235

H. Minezaki, K. Oshima, T. Uchida, M. Muramatsu, T. Asaji, A. Kitagawa, Y. Kato, R. Racz, S. Biri, and Y. Yoshida, Synthesis of endohedral iron-fullerene by ion implantation, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 85, 2014, pp. 02A945-1-3

DOI: 10.1063/1.4850756

T. Uchida, H. Minezaki, S. Ishihara, M. Muramatsu, R. Racz, T. Asaji, A. Kitagawa, Y. Kato, S. Biri, A. Drentje, Y. Yoshida, Status of the Bio-Nano ECRIS at Toyo University, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 85, 2014, pp. 02C317-1-3

DOI: 10.1063/1.4862212

〔学会発表〕(計5件)

浅地豊久, 大葉常行, 内田貴司, 峰崎英和, 大島康輔, 村松正幸, Biri Sandor, 北川敦志, 加藤裕史, 吉田善一, ECR イオン源におけるフラレンプラズマへの希ガス混合効果, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 2013年3月27日, 神奈川工科大学

T. Asaji, T. Ohba, T. Uchida, H. Minezaki, S. Ishihara, M. Muramatsu, R. Racz, S. Biri, A. Kitagawa, Y. Kato, Y. Yoshida, Fullerene-rare gas mixed plasmas in an electron cyclotron resonance ion source, The 15<sup>th</sup> International Conference on Ion Sources, 2013年9月11日, 幕張メッセ(千葉市)

T. Asaji, N. Hirabara, T. Izumihara, T. Hitobo, T. Ohba, T. Nakamizu, T. Nakamura, M. Furuse, Y. Kato, Design of a new electron cyclotron resonance ion source at Oshima National College of Maritime Technology, The 15<sup>th</sup> International Conference on Ion Sources, 2013年9月11日, 幕張メッセ(千葉市)

H. Minezaki, K. Oshima, T. Uchida, M. Muramatsu, T. Asaji, A. Kitagawa, Y. Kato, R. Racz, S. Biri, and Y. Yoshida, Synthesis of endohedral iron-fullerene by ion implantation, The 15<sup>th</sup> International Conference on Ion Sources, 2013年9月11日, 幕張メッセ(千葉市)

T. Uchida, H. Minezaki, S. Ishihara, M. Muramatsu, R. Racz, T. Asaji, A. Kitagawa, Y. Kato, S. Biri, A. Drentje, Y. Yoshida, Status of the Bio-Nano ECRIS at Toyo University, The 15<sup>th</sup> International Conference on Ion Sources, 2013年9月11日, 幕張メッセ(千葉市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浅地 豊久 (ASAJI, Toyohisa)

大島商船高等専門学校・電子機械工学科・准教授

研究者番号：70574565